第 37 卷第 19 期
2017 年 10 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.19
Oct.,2017

DOI: 10.5846/stxb201607111415

张玲, 张东来, 毛子军.中国温带阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化特征.生态学报,2017,37(19):6370-6378.

Zhang L, Zhang D L, Mao Z J.Characteristic mineralization of soil organic carbon in different successional series of broadleaved Korean pine forests in the temperate zone in China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(19):6370-6378.

中国温带阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化特征

张　玲[1,2], 张东来[3], 毛子军[1,*]

1 东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室,哈尔滨　150040

2 黑龙江省林业科学研究所,哈尔滨　150081

3 黑龙江省林业科学院,哈尔滨　150081

摘要:土壤有机碳矿化与陆地生态系统碳循环和全球气候变化关系密切,为准确评估中国温带小兴安岭阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化特征及变化规律。以年代序列法代替群落次生演替过程,采用室内恒温培养(碱液吸收法)测定阔叶红松林不同演替系列(中生演替系列、湿生演替系列、旱生演替系列)6 种群落类型土壤有机碳矿化量和矿化速率。3 个演替系列土壤有机碳含量均表现出一致的剖面变化特征,随着土层深度的加深有机碳矿化量逐渐降少。且不同演替系列土层间有机碳矿化量不同,中生演替系列原始阔叶红松林土壤有机碳累计矿化量最大,其次为旱生演替系列,湿生演替系列最小。3 个演替系列土壤有机碳矿化速率随时间变化呈现基本一致的趋势,即培养前期快速下降、后期逐渐趋于平稳。3 个演替系列 6 种群落类型土壤有机碳矿化差异显著,表现为原始阔叶红松林>白桦次生林>云冷杉红松林>红松枫桦次生林>蒙古栎红松林>蒙古栎、黑桦次生林。阔叶红松林不同演替系列土壤有机矿化采用非线性指数拟合效果较好。阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化与土壤全氮、凋落物量显著正相关,与土壤含水率、容重、土壤酸碱度显著负相关。不同演替系列群落的演替历史、土壤质地和养分状况等生态因子是导致阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化差异的原因。

关键词:阔叶红松林;演替系列;有机碳矿化;环境因子

Characteristic mineralization of soil organic carbon in different successional series of broadleaved Korean pine forests in the temperate zone in China

ZHANG Ling[1,2], ZHANG Donglai[3], MAO Zijun[1,*]

1 *Key Laboratory of Forest Plant Ecology of Ministry of Education*, *Northeast Forestry University*, *Harbin* 150040, *China*

2 *Forestry Research Institute of Heilongjiang Province*, *Harbin* 150081, *China*

3 *Heilongjiang Academy of Forestry*, *Harbin* 150081, *China*

Abstract: The soil carbon cycle and global climate change are closely related to the mineralization of carbon in terrestrial ecosystems. To accurately assess the characteristics of carbon mineralization and variation in the mineralization of carbon in different succession series (mesosere series, hydrosere series, and xerosere series) in the broadleaved Korean pine forests of the Xiaoxing' an Mountains in the temperate zone of China, we measured the mineralization of carbon and the mineralization rate based on the chronosequence method. The results showed that the carbon mineralization rate and the extent of carbon mineralization in the three successional series exhibited consistent cross-sectional variation, and gradually decreased with depth. The extent of carbon mineralization in the different successional series was different. The virgin forest

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31270494,31600485);黑龙江省林业科学院基金资助(201403)

收稿日期:2016-07-11;　　**网络出版日期:**2017-05-27

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zijunm@ nefu.ede.cn

accumulated soil organic carbon and mineralization in the mesosere was the greatest among the three series, followed the xerosere and hydrosere series. The carbon mineralization rate of the three successional series varied with time and exhibited a consistent trend (decreasing quickly during the first stage and gradually stabilizing). The six kinds of community-type carbon mineralization in the three successional series were significantly different. The carbon mineralization rate of the three successional series in broadleaved Korean pine forests was original forest > *Betula platyphylla-Pinus koraiensis* forest > *Picea koraiensis-Pinus koraiensis* forest > *Betula costata-Pinus koraiensis* forest > *Quercus-mongolica-Pinus koraiensis* forest > *Betula davurica-Pinus koraiensis* forest. Mesosere series carbon mineralization fit a nonlinear exponential better. Carbon mineralization of soil organic carbon was significantly positively correlated with soil total nitrogen and litter-fall amount in different successional series in the broadleafed Korean pine forests, and negatively correlated with soil moisture, soil bulk density, and soil pH. In short, successional histories, soil texture, and nutrient status resulted in differences in soil organic carbon mineralization of the different succession series in the broadleaved Korean pine forests.

Key Words: Korean pine forests; succession; mineralization of soil organic carbon; environmental factors

土壤碳库是地球表层最大的有机碳库,在全球碳循环中起着关键作用[1-3]。土壤有机碳矿化数量与强度可以反映土壤质量状况,同时可以评价人为因素或环境因素变化对其产生的影响[4]。

群落演替系列是完全不依据裸露地的土壤结构-养分的不同,而是依据它们的特殊水分关系来进行分类,分为旱生演替系列(xeroseres)、湿生演替系列(hydroseres)及中生演替系列(mesoseres)[5]。森林生态系统固碳过程中,森林演替起着非常重要的作用[6]。群落的演替过程也是植物与土壤相互影响的过程,土壤为植物的存在和发展提供必要的物质基础,植被的出现是对土壤不断适应和改造的过程。在这个过程中,地上部分植被逐步变化,地下碳积累也随之发生改变[2]。国内研究土壤有机碳矿化较多,主要涉及土地利用、外源有机物质添加、不同温度培养、不同含水量培养等[7-13],然而人们对森林土壤活性碳库动态与生态系统过程的联系还知之甚少,对影响土壤碳动态因素的理解仍然支离破碎[14],因为大多数研究主要集中在单一的土壤类型或地点,对于植被演替过程中土壤碳动态及其驱动力的规律性认识仍非常有限。这无疑限制了人们对由于人类导致的气候变化下未来森林生态系统变化趋势的准确估测[14-15]。因此系统研究森林演替过程中土壤有机碳矿化的特性及其驱动机制有助于准确估测森林生态系统的碳收支能力及未来动态,降低估测的误差和不确定性,实现土壤碳的有效管理具有重要的理论及实践意义。

阔叶红松林是中国温带小兴安岭地区主要的森林类型,是我国东北林水源涵养林的重要组成部分[16]。随着 20 世纪 50—60 年代森林的大规模开发利用,原始红松林被大面积采伐,随后进行了以针阔叶为主要树种的天然更新:以白桦 *Betula platyphylla* Suk、落叶松 *Larix gmelini*(Rupr.)Rupr.、枫桦 *B.costata* Trautv.、蒙古栎 *Quercus mongolica* Fisch.ex Turcz 等阔叶先锋树种普遍而大量的发生。然而,对于这些不同的次生演替系列森林群落土壤矿化特征及其影响机制缺乏系统研究和规律性的认识,本研究分别以原始阔叶红松林不同演替系列为研究对象,测定土壤有机碳累积矿化量和矿化率,并对土壤潜在可矿化碳等参数进行拟合,分析土壤有机碳累积矿化量和潜在可矿化碳与土壤环境因子的关系,旨在揭示针阔混交林不同次生演替系列土壤有机碳矿化与群落-土壤基质协同变化规律与驱动机制,为准确评价我国温带北部森林土壤碳平衡及我国碳库管理提供科学参考和必要的数据支撑[17]。

1　研究区概况及研究方法

1.1　研究区概况

本研究样地位于中国小兴安岭山脉黑龙江省凉水国家级自然保护区(47°10′50″N、128°53′20″E),该区具有明显的温带大陆性季风气候特征,年均气温-0.3℃,年均最低气温-6.6℃,年均最高气温 7.5℃,年降水量 680 mm,无霜期 120 d。地带性植被为以红松(*Pinus koraiensis*) 为主的针阔混交林(即原始阔叶红松林)。原

始阔叶红松林,林龄 250 a 以上。而 20 世纪 50—80 年代被大面积砍伐已演变成以白桦、枫桦、山杨(*Populus davidiana*)为主的阔叶次生林,林龄在 40a 以上,样地概况如表 1。该地区为典型的低山丘陵地貌,海拔为 300—500 m,坡度多为 10°—25°,地带性土壤类型为暗棕壤[18],土壤基本情况如表 2。

表 1 不同演替系列典型群落类型样地概况

Table 1 General situation of different succession series forest sample plots

演替系列 Succession series	群落类型 Community type	海拔 Elevation/m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope/(°)	郁闭度 Canopy	主要树种组成 Major component tree species
中生演替系列 Mesoseres series	阔叶红松林 PKF	346	东南	20	0.8	红松(*Pinus koraiensis*)、五角槭(*Acer mono*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)
	红松枫桦次生林 BCF	400	西北	15	0.7	枫桦(*Betula costata*)、红松、五角槭、白桦(*Betula platyphylla*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)、暴马丁香(*Syringa amurensis*)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、榛子(*Corylus heterophylla*)
湿生演替系列 Hydroseres series	云冷杉红松林 PPF	330	西北	3	0.8	红皮云杉(*Picea koraiensis*)、红松、臭冷杉、稠李(*Prunus padus*)、暴马丁香、白桦、花楷槭(*Acer ukurunduense*)
	白桦次生林 BPF	310	西	4	0.8	白桦、红松、兴安落叶松(*Larix gmelini*)、春榆(*Ulmus japonica*)
旱生演替系列 Xeroseres series	蒙古栎红松林 QMF	392	南	40	0.9	红松、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、枫桦、糠椴、毛榛子(*Corylus mandshurica*)
	蒙古栎黑桦林 BDF	430	南	25	0.8	蒙古栎、黑桦(*Betula davurica*)、毛榛子、黄花忍冬(*Lonicerachysantha*)

PKF:*Pinus koraiensis* forest; BCF:*Betula costata-Pinus koraiensis* forest; PPF:*Picea koraiensis-Pinus koraiensis* forest; BPF:*Betula platyphylla-Pinus koraiensis* forest; QMF:*Quercus mongolica-Pinus koraiensis* forest; BDF:*Butula dayurica-Pinus koraiensis* forest

表 2 不同演替系列土壤基本情况

Table 2 General situation of soil in different succession series

演替系列 Succession series	群落类型 Community type	土壤有机质 Soil organic carbon/(g/kg)	全氮含量 The content of total nitrogen/(mg/L)	土壤 pH Soil pH	土层厚度 Soil layer /cm	土壤容重 Soil bulk density /(g/cm^3)	沙粒比 The sand rate/%
中生演替系列	阔叶红松林 PKF	35.79	2.85	5.42	50	1.18	0.41
Mesoseres series	红松枫桦次生林 BCF	28.73	1.83	5.61	45	1.16	0.42
湿生演替系列	云冷杉红松林 PPF	36.81	2.45	4.85	40	1.12	0.43
Hydroseres series	白桦次生林 BPF	44.98	1.84	5.04	45	1.16	0.51
旱生演替系列	蒙古栎红松林 QMF	41.14	2.10	5.48	35	1.02	0.58
Xeroseres series	蒙古栎黑桦林 BDF	26.80	1.34	5.45	40	1.01	0.62

1.2 实验设计

中生演替系列选择原始阔叶红松林和红松枫桦次生林;湿生演替系列选择云冷杉红松林和白桦次生林;旱生演替系列选择蒙古栎红松林和蒙古栎、黑桦次生林为研究对象,每种演替系列选择相似立地条件的顶级群落和主要次生演替群落,每个群落选 3 块标准样地,样地面积为 20 m×20 m,每个样地取 3 个点,每个点做土壤剖面,每个剖面分别在 0—10,10—20,20—40,40—60 cm 分层取样,每种群落类型共取 36 个土样,每个点共取土样 1 kg 左右,将新鲜土样去除根系、凋落物等,过 2 mm 筛后分成两部分,一部分装入无菌塑料袋密封后 4℃冰箱保存,一部分风干处理。

1.3　测定项目及方法

土壤有机碳含量:重铬酸钾-外加热法。土壤全氮(TN)用凯氏定氮法。采用环刀法测定土壤容重和自然含水率;pH 采用水土比 2.5∶1,pH 计测定。土壤沙粒比采用吸管法(0.25—1 mm);凋物量采用 0.5 m×0.5 m 面积,烘干称重。

土壤矿化碳采用室内密闭的碱液吸收培养法, 称取过 2mm 筛的风干土样 100 g 于 500 mL 呼吸瓶底部,调节土壤含水量为田间持水量的(60±5)%,将盛有 20 mL 0.5 mol/L NaOH 溶液的吸收瓶小心悬挂在土壤的上方,将呼吸瓶盖紧,并用封口膜密封,保证密封性。密封广口瓶口后于(25±1)℃恒温培养培养 91 d。培养期间,每 5 d 换 1 次气。在培养的第 2、4、8、12、16、23、30、37、44、51、61、71、81、91 天,然后将 NaOH 完全转移于 100 mL 三角瓶中,加入 1 mol/L 的 $BaCl_2$20 mL 和酚酞指示剂 2 滴, 用 0.5 mol/L 的标准盐酸滴定至红色消失。同时,以 20 mL 蒸馏水代替土壤作为对照,通过消耗的 HCl 量计算出在此期间内释放的碳的摩尔质量,土壤有机碳矿化采用释放 CO_2量折合成有机碳含量。进而求出有机碳的分解量及分解速率。每处理重复 3 次。

1.4　土壤有机碳矿化过程数据分析

采用非线性曲线指数函数拟合,利用 SPSS 19.0 软件和 LSD 多重比较法检验差异显著性(α=0.05);利用 Pearson 相关系数评价各因素间的关系,并进行有机碳矿化方程的拟合,图表中数据为平均值±标准差;土壤有机碳矿化过程的拟合采用 Origin 8.0 软件进行。

2　结果与分析

2.1　不同演替系列土壤有机碳矿化特征

结果表明,不同演替系列土壤有机碳矿化量均表现为表层高于底层的规律,且不同演替系列土层间有机碳矿化量不同,其中中生演替系列原始阔叶红松林土壤有机碳矿化量最大,其次为旱生演替系列的蒙古栎红松林,旱生演替系列中的蒙古栎、黑桦林土壤有机碳矿化量最小(图 1)。中生演替系列原始林与次生林土壤有机碳矿化量极显著差异(P<0.01),原始阔叶红松林 0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层土壤有机碳矿化累计量占整个剖面的比例的 62.39%和 22.72%,红松枫桦次生林 0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层土壤有机碳矿化

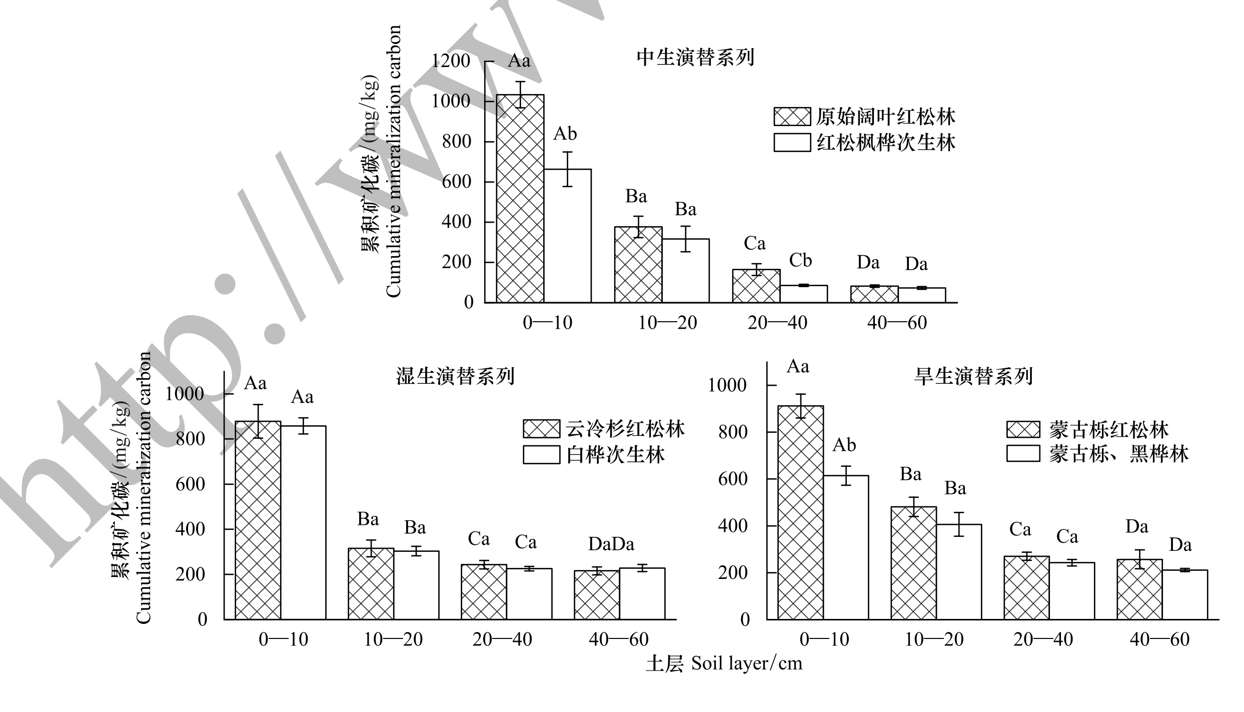


图 1　不同演替系列土壤有机碳矿化量

Fig.1　Mineralization carbon of SOC in different sucession series

碳占整个剖面比例的58.26%和27.82%,湿生演替系列云冷杉红松林0—10 cm和10—20 cm层土壤矿化量占整个剖面的53.16%和19.07%;白桦次生林0—10 cm层和10—20 cm层占整个剖面的53.15%和18.78%,湿生演替系列2个演替阶段土壤垂直结构有机碳矿化量差异不显著。旱生演替系列土壤有机碳矿化量达到显著差异(0.01<P<0.05),旱生演替系列蒙古栎红松林0—10 cm层和10—20 cm层,土壤有机碳矿化量占整个土壤剖面47.46%,25.06%。蒙古栎、黑桦次生林0—10 cm层和10—20 cm层土壤有机碳矿化量占整个剖面的41.64%和27.54%。3个演替系列10—20 cm层和20—40 cm层存在显著差异,40—60 cm层差异不显著。

2.2 不同演替系列土壤有机碳矿化率总体特征

不同演替系列土壤有机碳矿化速率随时间变化呈现基本一致的趋势(图2—图4),即培养前期快速下降、后期逐渐趋于平稳。中生演替系列2个群落差异性极显著(P<0.01),配对效果检验相关系数达0.988。回归分析表明,培养期间中生演替系列2个群落土壤有机碳矿化速率随时间的变化符合指数函数,拟合效果均达到极显著水平(P<0.01),阔叶红松林和红松枫桦次生林中的R^2分别达到0.98751和0.99388(表3)。中生演替系列土壤矿化特征为:0—15 d快速矿化,15—30 d,矿化速率总体呈现缓慢下降趋势;30—91 d,矿化速率趋于稳定(图2)。

湿生演替系列土壤矿化特征为:云冷杉红松林0—10 d快速矿化,11—91 d,矿化速率总体呈现缓慢下降趋势。白桦次生林0—16 d快速矿化,17—71 d,矿化速率总体呈现缓慢下降趋势,72—91 d趋于稳定。湿生演替系列总体推理假设及其检验认为云冷杉红松林与白桦次生林土壤有机碳矿化差异不显著,配对效果检验系数为0.966(P<0.01),很显著。培养期间土壤有机碳矿化速率随时间的变化符合指数函数,拟合效果均达到极显著水平(P<0.01),R^2分别达到0.93475和0.98857(图3)。

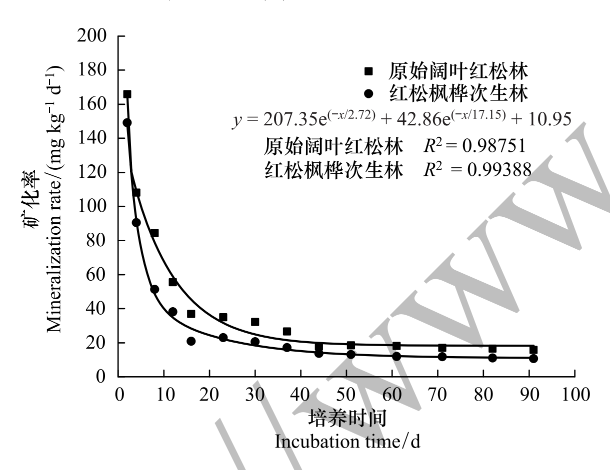


图2 中生演替系列土壤有机碳矿化率

Fig.2 Soil SOC mineralization rate in mesoseres series

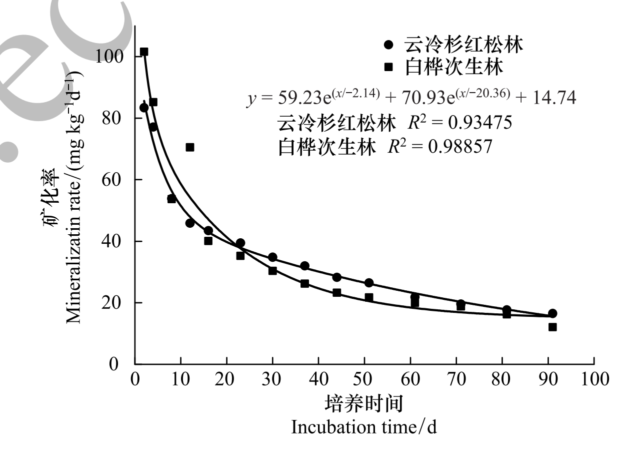


图3 湿生演替系列土壤有机碳矿化率

Fig.3 Soil SOC mineralization rate in hydroseres series

旱生演替系列土壤矿化特征为:0—12 d快速矿化,13—91 d,矿化速率总体呈现缓慢下降趋势并趋于稳定。旱生演替系列土壤有机碳矿化率配对效果检验系数为0.992(P<0.05),很显著。回归分析表明,培养期间土壤有机碳矿化速率随时间的变化符合指数函数,拟合效果均达到极显著水平(P<0.01),R^2分别达到0.97584和0.9927(图4)。

2.3 不同群落类型土壤有机碳矿化率垂直特征

小兴安岭阔叶红松林不同演替系列6种群落类型土壤矿化率总体表现为原始阔叶红松林>白桦次生林>云冷杉红松林>红松枫桦次生林>蒙古栎红松林>蒙古栎、黑桦次生林。原始阔叶红松林0—10 cm层平均矿化率达到112.57 mg kg^{-1} d^{-1},10—20 cm为45.58 mg kg^{-1} d^{-1},20—40 cm为18.31 mg kg^{-1} d^{-1},40—60 cm为10.81 mg kg^{-1} d^{-1},而红松枫桦林平均矿化率4层分别为:83.90、35.17、10.21、8.79mg kg^{-1} d^{-1}。云冷杉红松林0—10 cm层培养矿化率达到为78.48 mg kg^{-1} d^{-1};10—20 cm层为38.59 mg kg^{-1} d^{-1},20—40 cm为

21.29 mg kg⁻¹ d⁻¹;40—60 cm 为 16.06 mg kg⁻¹ d⁻¹,白桦次生林 0—10 cm 层矿化率为:90.54 mg kg⁻¹ d⁻¹;10—20 cm 层为 25.70 mg kg⁻¹ d⁻¹;20—40 cm 层为 20.58 mg kg⁻¹ d⁻¹;40—60 cm 层为 21.78 mg kg⁻¹ d⁻¹;蒙古栎红松林矿化率 4 层平均值 63.03、34.08、14.51、3.98 mg kg⁻¹ d⁻¹蒙古栎黑桦次生林 4 层矿化率平均值为 34.74、21.05、12.05、11.71 mg kg⁻¹ d⁻¹(图 5)。

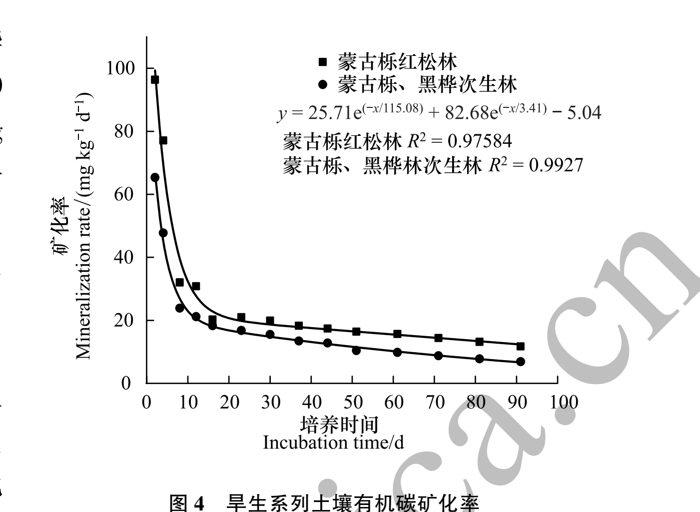


图 4 旱生系列土壤有机碳矿化率

Fig.4 Soil SOC mineralization rate in xeroseres series

2.4 不同演替系列土壤有机碳矿化与生境关系

不同演替系列 6 种群落类型土壤有机碳矿化与土壤含水率、土壤酸碱度、土壤容重负相关,与土壤全氮、凋落物量、沙粒比显著正相关(表 4)。土壤有机碳矿化与土壤全氮含量和凋落物量的关系最密切,相关系数最大,达到 0.458(P<0.01)和 0.461(P<0.01);土壤中沙粒比对土壤有机碳矿化的影响也较明显,相关系数达 0.332,说明土壤质地和养分含量的高低对土壤有机碳矿化也会产生影响。

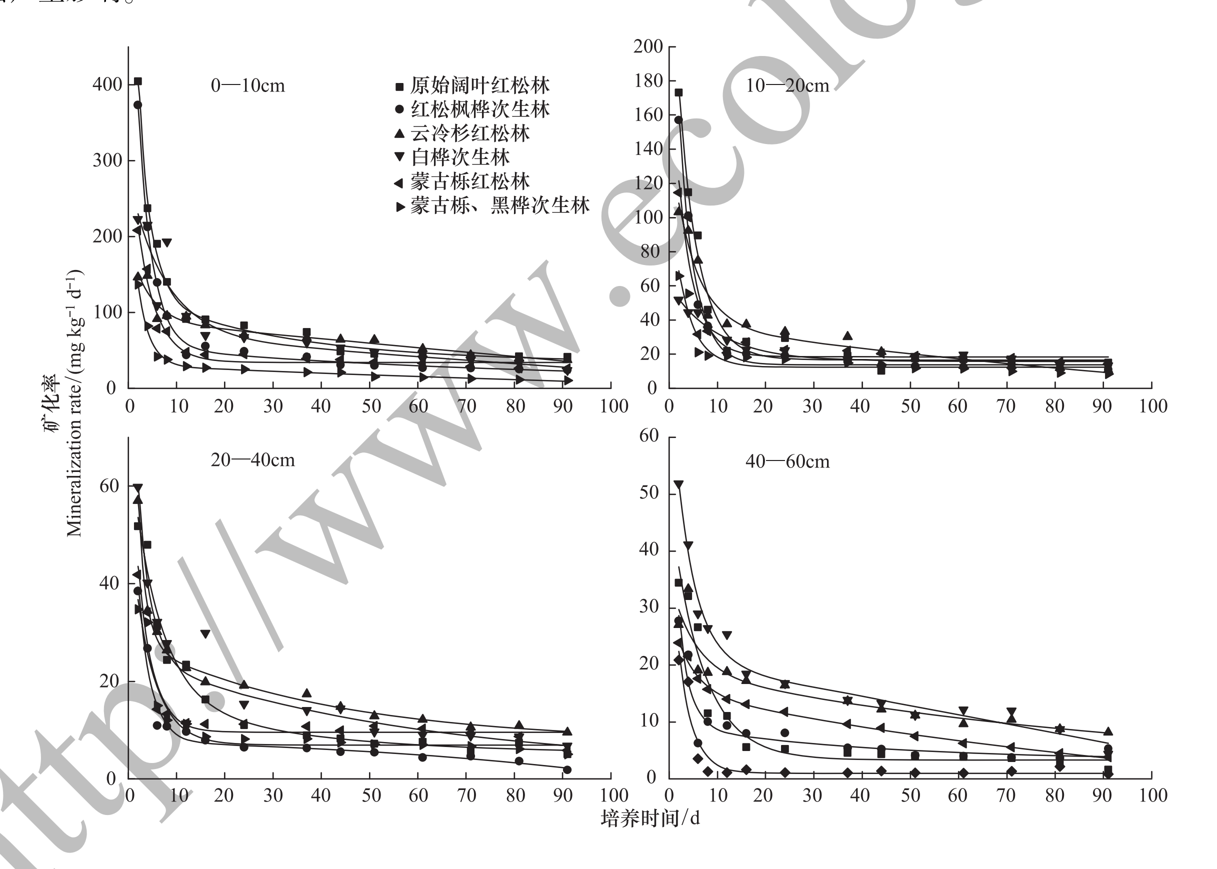


图 5 群落类型土壤有机碳矿化率垂直结构

Fig.5 The mineralization ratios of SOC in different community

3 讨论

3.1 不同演替系列土壤有机碳矿化规律

小兴安岭阔叶红松林中生演替系与湿生、旱生演替系列土壤有机碳矿化量差异显著(P<0.05),湿生演替与旱生演替系列土壤有机碳矿化差异不显著。中生演替系列矿化碳累积量最多,其次是旱生演替系列,湿生

表 3 不同演替系列土壤有机碳矿化率拟合

Table 3 The personification of mineralization rate in different succession series at broadleaved Korean pine forest

土壤层数/cm Soil layer		中生演替系列 Mesoseres series		湿生演替系列 Hydroseres series		旱生演替系列 Xeroseres series	
		阔叶红松林 Broadleaved korean pine	红松枫桦次生林 Secondary fores of B.Costata	云杉红松林 Picea jezoensis and Korean pine forest	白桦次生林 Betula platypytta secondary forest	蒙古栎红松林 Quercus mongolica forest	蒙古栎、黑桦次生林 Q.mongolica and. davurica forest
0—10	R^2	0.99076	0.999554	0.90969	0.84112	0.96246	0.99067
	P	0.001	0.007	0.000	0.000	0.001	0.002
10—20	R^2	0.97484	0.98757	0.94893	0.94379	0.87687	0.87861
	P	0.005	0.009	0.000	0.000	0.001	0.001
20—40	R^2	0.96805	0.96071	0.99236	0.89479	0.90078	0.90786
	P	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
40—60	R^2	0.92819	0.86223	0.81032	0.98561	0.87583	0.99404
	P	0.004	0.001	0.000	0.000	0.038	0.000

表 4 3 个演替系列土壤有机碳矿化与土壤因子相关性分析

Table 4 Correlations between decomposition rate of mineralization carbon and soil factors in three succession series

因素 Factor	植被类型 Type of plantation	矿化碳 Mineralization of SOC/(mg/kg)	土壤含水率 Water content of soil/%	土壤 pH Soil pH	沙粒比 The ratio of sand/%	土壤容重 Soil bulk density/(g/cm³)	土壤全氮 Soil total N /(g/kg)	凋落物量 Content of litterfall/(g/m²)
植被类型 Type of plantation	1							
矿化碳累积量矿化碳 Mineralization of SOC/(mg/kg)	0.376**	1						
土壤含水率 Water content of Soil/%	−0.608**	−0.167	1					
土壤 pH Soil pH	−0.047	−0.185	−0.460**	1				
沙粒比 The ratio of sand/%	0.393*	0.332*	−0.430**	0.139	1			
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm³)	−0.636**	−0.123	0.436**	−0.111	−0.171	1		
土壤全氮 Soil total N/(g/kg)	0.14	0.458**	0.259	−0.307*	0.116	−0.019	1	
凋落物量 Content of litterfall/(g/m²)	0.591**	0.416**	−0.715**	0.422**	0.362**	−0.460**	0.038	1

** 在 0.01 水平上显著相关; * 在 0.05 水平上显著相关

演替系列最低。本研究认为产生差异的主要原因首先是群落发展历史,即演替时间,Zhang 认为土壤有机碳矿化累积量随着林龄的增长而增加[8],Deng 对中国甘肃黄土高源不同演替系列土壤活性有机碳研究表明,演替时间为 150a 次生演替群落活性有机碳、全氮、碳氮比明显著高于次生演替为 50a 龄林的群落[19]。本研究中中生演替系列原始阔叶红松林林龄约为 250a,次生演替系列林龄约为 40a[18],原生植被从原先曾为植物所占住的土壤获得巨大的好处,已含有具氮素的腐殖质,维持着一个活跃的微生物群,使腐烂的根系及枯枝层养分比起从前更为丰富[5],积累了更多的有机碳,而土壤有机碳含量与矿化碳显著正相关[20]。其次,中生演替系列群落发育成熟,群落结构复杂物种多样性丰富,土层较厚,其土层厚度达到 35—50 cm,且湿度适宜,养分释放与归还能力强[21]。湿生演替系列演替初期是沼泽或湿地,对某些原生植物而言是胁迫状态不利于其生长,而且在多水生境上开始的群落,随水分的增加,限制了土壤微生物活性,进而影响土壤活性有机碳的积累和释放[11]。旱生演替系列土层厚度为 15—40 cm,而土壤含水率较低,旱生演替系列土壤几乎是贫瘠的和无结构的,某些养分可能严重地不足,这样,植被发展的速度就受到这些限制因子的制约,进而影响土壤活性有

机碳矿化积累与释放[22]。

3.2　不同演替系列土壤有机碳矿化影响因素

小兴安岭阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化与凋落物量和土壤全氮量显著正相关(R=0.383;R=0.458),与土壤含水率、土壤容重、沙粒比显著负相关(P<0.01)(表4)。一方面原因可能是不同群落类型的微气候环境、地被物、根系分布模式、凋落物化学组成及活性的不同都会导致微生物活性的不同[23-24]。本研究原始林均为针阔叶混交林,次生林优势树种多为阔叶树种,次生林结构简单,郁闭度相对原始林小(表2),6种群落类型的优势树种和其他植被组成都不尽相同,凋落物组成有很大的不同,生境条件及其植物自身的生理活动特点也不同,形成了不同的土壤有机质的输入和输出方式,进而影响土壤有机碳矿化的变化[25]。王淼对阔叶红松林、岳桦林和冷杉暗针叶林矿化碳进行研究,认为阔叶红松林土壤有机碳矿化率最高,岳桦林次之,冷杉林最低[23]。同时,刘瑞鹏[26]、郭鲲[27]等研究模拟增温和凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响研究结果表明,在同一温度下混合凋落物分解速率大于单一凋落物分解速率。其次,土壤氮含量和存在形式在演替的不同时期存在显著差别[28],结果表明,不同演替系列原始林土壤全氮含量大于次生林全氮含量(表2),即阔叶红松林>红松枫桦次生林;云冷杉红松林>白桦次生林;蒙古栎红松林>蒙古栎黑桦次生林,与土壤有机碳矿化变化情况一致,因为植物充分利用氮素形成生物量而导致的矿化碳积累增加[29],说明土壤中氮的含量可能是影响土壤有机碳滞留的重要因素[30]。姜培坤发现土壤活性有机碳与TN之间存在很好的相关性[31],由此进一步说明土壤中氮的含量会影响土壤有机碳矿化作用。在这个过程中,地上部分植被逐步演替,带来地下部分碳平衡及累积速率发生改变[32]。再次,土壤紧实度与土壤有机碳矿化呈极显著的负相关,中生演替系列土壤紧实度稍紧(紧实度1.16—1.19 g/cm^3),土壤通气性、保水能力较好,微生物活动和养分转化不受影响。旱生系列土壤层较薄,土层较松(平均1.01—1.05 g/cm^3),湿生演替系列土层稍厚些,但紧实度稍紧,影响土壤微生物活动和养分转化。因此,一般地说,一个演替系列中的每个群落对于改变大的环境,起着一定的作用。

3.3　土壤有机碳矿化与植被类型的关系

植被是土壤有机碳的重要来源,植被类型不同,有机碳输出方式不同,有机碳矿化也就不同[33]。总体上3个系列均为原始林土壤有机碳矿化率高于次生林,这与李菲、廖洪凯研究结果一致[34-35]。中生演替系列中阔叶红松林与红松枫桦次生林土壤有机碳矿化量差异极显著(P<0.01),湿生演替系列云冷杉红松林与白桦次生林差异不显著(P>0.05),旱生演替系列蒙古栎红松林与蒙古栎、黑桦次生林土壤有机碳矿化差异极显著(P<0.01)。阔叶红松林东南坡位,地势较平缓,物种多样性丰富,红松枫桦次生林样地位于阳坡上部陡坡,坡度较大,土壤中的有机物质及凋落物容易被雨水带走,不利于有机碳的累积[36],云冷杉红松林土壤湿度较白桦次生林土壤湿度大,50 cm以下长年积水,这种环境有利于凋落物分解,通过淋溶作用进入土壤层有机物质就多。因此,云冷杉红松林土壤有机碳矿化量碳积累较白桦次生林多。蒙古栎、黑桦次生林在次生林区的冈脊部位,尤其经反复破坏和火烧后,是诸立地类型中最为干旱瘠薄的一类,土层厚度最薄,其优势种是比较耐旱的蒙古栎和黑桦。群落类型不同,凋落物组成、土壤酸碱度不同,微生物活性不同,不同群落类型有机碳矿化量取决于植物品种和凋落物输入和分解,同时也取决于土壤的性质,均会导致土壤有机碳矿化的差异。

4　结论

中国温带小兴安岭阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化差异显著。中生演替系列原始阔叶红松林土壤有机碳累计矿化量最大,其次为旱生演替系列,湿生演替系列最小。3个演替系列6种群落类型土壤有机碳矿化累积量总体上表现为原生演替系列大于次生演替系列。3个演替系列6种群落类型土壤有机碳矿化速率随时间变化呈现基本一致的趋势,即培养前期快速下降、后期逐渐趋于平稳。阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化与土壤全氮、凋落物量显著正相关,与土壤含水率、容重、土壤酸碱度显著负相关。不同演替系列群落的演替历史、土壤质地和养分状况等生态因子是导致阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化差

异的原因。

参考文献(References):

[1] Post W M,Emanuel W R,Zinke P J,Stangenberger A G. Soil carbon pools sand world life zones.Nature, 1982,298(5870): 156-159.
[2] 陈小梅,闫俊华,林媚珍,褚国伟,吴建平,张德强.南亚热带森林植被恢复演替中土壤有机碳组分及其稳定性.地球科学进展, 2016,31(1):86-93.
[3] 王岩松,李梦迪,朱连奇.土壤有机碳库及其影响因素的研究进展.中国农学通报,2015,31(32): 123-131.
[4] 李顺姬,邱莉萍,张兴昌.黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系.生态学报,2010,30(5):1217-1226.
[5] Daubenmire R.植物群落——植物群落生态学教程.陈庆诚,译.北京:人民教育出版社,1981
[6] 范跃新,杨玉盛,杨智杰,谢锦升,陈光水,钟小剑,郭剑芬.中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态.生态学报,2013,33(18):5751-5759.
[7] Lentz R D, Ippolito J A. Biochar and manure affect calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake.Journal of Environmental Quality, 2012,41(4):1033-1043.
[8] Zhang Q Z, Wang X H, Du Z L,Liu X R,Wang Y D.Impact of biochar on nitrate accumulation in an alkaline soil. Soil Research,2013,51(6):521-528.
[9] Guo J F,Yang Y S,Chen G S,Xie J S,Yang Z J. Carbon mineralization of Chinese fir(Cunninghamia lanceolata)soils under different temperature and humidity conditions.Acta Ecological Sinica,2014,34,66-71.
[10] Tian J,Pausch J,Yu G R,Blagodatskaya E,Gao Y,Kuzyakov Y. Aggregate size and their disruption affects 14C-labeled glucose mineralization and priming effect.Applied Soil Ecology,2015,90,1-10.
[11] El-Naggar A H,Usman,A R A,Al-Omran A,Ok Y S,Ahmad M,Al-Wabel M I.Carbon mineralization and nutrient availability in calcareous sandy soils amended with woody waste biochar.Chemosphere,2015,138:67-73.
[12] Jagadamma S,Mayes M.A.Steinweg,J.M.,Schaeffer S M.Substrate quality alters the microbiale mineralization of added substrate and soil organic carbon.Biogeosciences,2014,11(17):4665-4678.
[13] Gunes A, Inal A, Taskin M B,Sahin O,Kaya E C,Atakol A. Effect of phosphorus-enriched biochar and poultry manure on growth and mineral composition of lettuce (Lactuca sativa L. cv.) grown in alkaline soil. Soil Use and Management, 2014,30(2):182-188.
[14] Milcu A, Heim A, Ellis R J, Scheu S,Manning P. Identification of general patterns of nutrient and labile carbon control on soil carbon dynamics across a successional gradient. Ecosystems, 2011,14(5): 710-719.
[15] Weber P., Bardgett R. D. Influence of single trees on spatial and temporal patterns of belowground properties in native pine forest. Soil Biology & Biochemistry,2011, 43(6),1372-1378.
[16] Jandl R,Lindner M,Vesterdal L,Bauwens B,Baritz R,Hagedorn F,Johnson D W,Minkkinen K,Byrne K A.How strongly can forest management influence soil carbon sequestration.Geoderma,2007,137(3/4),253-268.
[17] 丁一阳,毛子军,张玲,丁力.小兴安岭原始阔叶红松林和枫桦次生林土壤有机碳库比较研究. 植物研究,2015,35(4):604-611.
[18] 邬建红,潘剑君,葛序娟,王恒钦,余文飞,李炳亚.不同土地利用方式下土壤有机碳矿化及其温度敏感性. 水土保持学报,2015,29(3):130-135.
[19] 高菲,林维,崔晓阳.小兴安岭两种森林类型土壤有机碳矿化的季节动态.应用生态学报,2015,27(1):9-16.
[20] Deng L,Wang K B,Cheng M L,Shangguan Z P,Sweeney S. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau,China.Catena,2013,110,1-7
[21] 吴建国,艾丽,朱高,田自强,苌伟.祁连山北坡云杉林和草甸土壤有机碳矿化及其影响因素.草地学报,2007,15(1):20-28.
[22] 高志涛,吴晓春.蒙古栎地理分布规律的探讨.防护林科技,2005,65(2):83-84.
[23] 王淼,姬兰柱,李秋荣,刘延秋.土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响.应用生态学报,2003,14(8):1234-1238.
[24] Priha O,Grayston S J,Hiukka R,Pennanen T,Smolander A.Microbial community structure and characteristics of the organic matter in soils under Pinus sylvestris,Pices abies and Betulapendula at two forestsites.Biology and Fertility of Soils.2001,33(1):17-24.
[25] 宋媛,赵溪竹,毛子军,孙涛,侯玲玲.小兴安岭4种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性. 生态学报,2013,33(2):443-453.
[26] 刘瑞鹏,毛子军,李兴欢,孙涛,李娜,吕海亮,刘传照.模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响。生态学报,2013,33(18):5661-5667.
[27] 郭鲲,刘瑞鹏,张玲,毛子军.原始阔叶红松林下红松、蒙古栎混合凋落叶分解特征及相互作用研究.植物研究,2015,35(5):716-723.
[28] 李庆康,马克平.植物群落演替过程中植物生理生态学特性及其主要环境因子的变化.植物生态学报,2002,26(S):9-19.
[29] Pastor J,Stillvell M A,Tilman D.Nitrogen mineralization and nitrification in four Minnesota old fields.Oecologia,1987,71(4):481-485.
[30] Iqbal J,Hu R G,Lin S,Ahamadou B,Feng M.Carbon dioxide emissions from Ultisol under different land uses in mid-subtropical China.Geoderma,2009,152(1/2):63-73.
[31] 姜培坤.不同林分下土壤活性有机碳库研究.林业科学,2005,41(1):10-13.
[32] 周国逸, 周存宇, Liu S G,唐旭利,欧阳学军,张德强,刘世忠,刘菊秀,闫俊华,温达志,徐国良,周传艳,罗艳,官丽莉,刘艳.季风常绿阔叶林恢复演替系列地下部分碳平衡及累积速率.中国科学, 2005,35(6):502-510.
[33] 丁越岿,杨劼,宋炳煜,呼格吉勒图,张琳.不同植被类型对毛乌素沙地土壤有机碳的影响.草业学报,2012,21(2):1-25.
[34] 李菲,李娟,龙健,廖洪凯,刘灵飞,张文娟.典型喀斯特山区植被类型对土壤有机碳、氮的影响.生态学杂志,2015,34(12):3374-3381.
[35] 廖洪凯,龙健,李娟,杨江江,冯业强.西南地区喀斯特干热河谷地带不同植被类型下小生境土壤碳氮分布特征。土壤,2012,44(3):421-428.
[36] 孙宝伟,杨晓东,张志浩,马文济,Arshad A,黄海侠,阎恩荣.浙江天童常绿阔叶林演替过程中土壤碳库与植被碳归还的关系.植物生态学报,2013,37(9):803-810.